

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

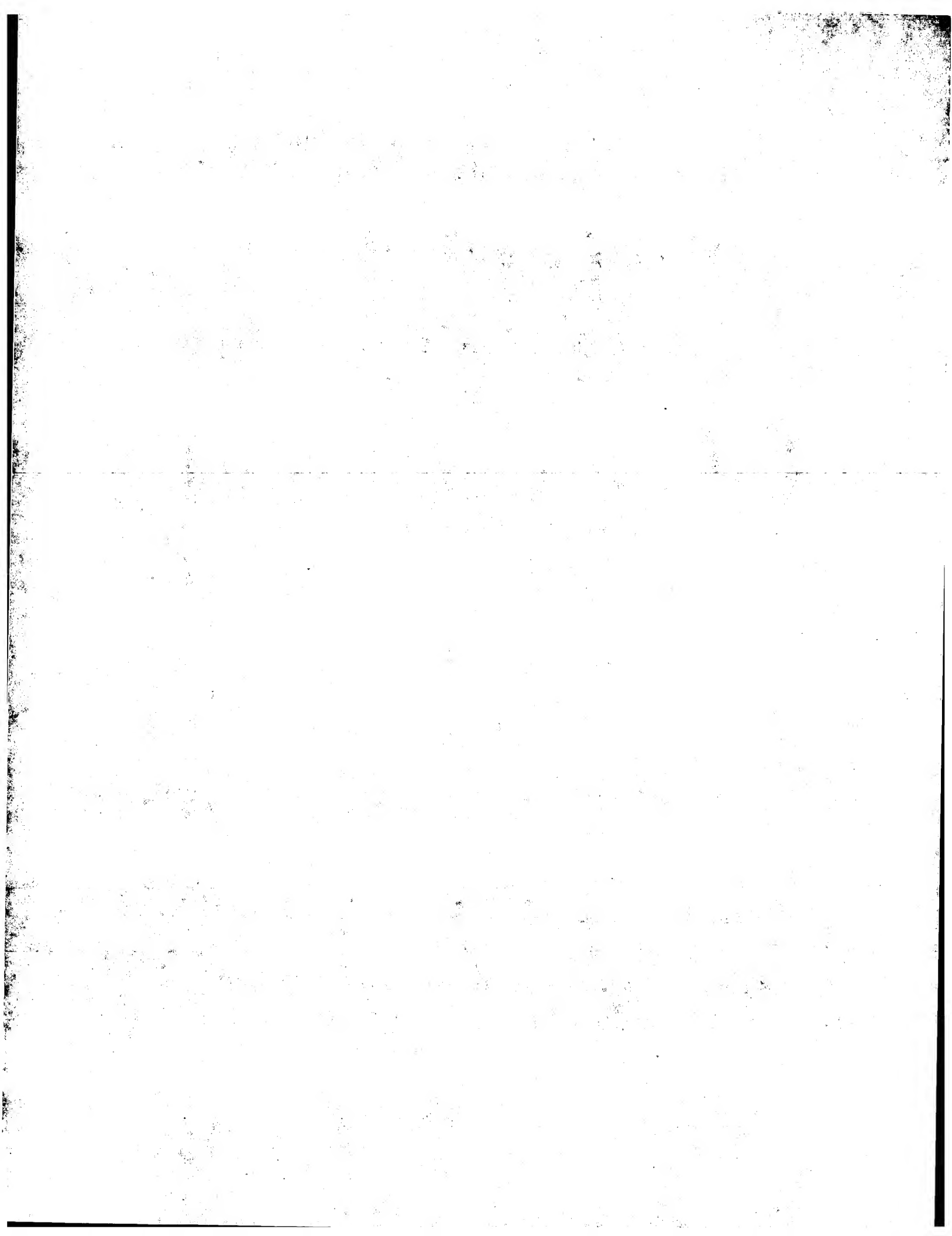
Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**





19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Patentschrift
10 DE 198 21 873 C 2

51 Int. Cl.⁷:
B 25 J 19/00

21 Aktenzeichen: 198 21 873.7-15
22 Anmeldetag: 15. 5. 1998
43 Offenlegungstag: 25. 11. 1999
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 13. 7. 2000

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:
Institut für Werkzeugmaschinen und
Betriebswissenschaften TU München, 84518
Garching, DE
74 Vertreter:
Schweizer, J., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 80993 München
72 Erfinder:
Gräser, Ralf-Gunter, 80636 München, DE; Klingel,
Robert, 85386 Eching, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 33 02 063 A1
US 54 00 638
US 46 68 157

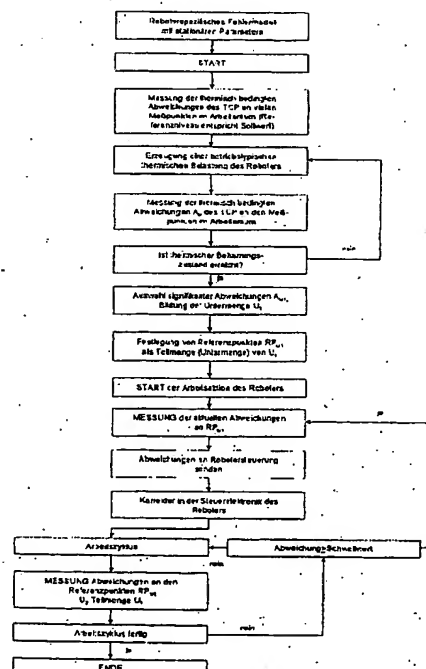
SONDERMANN, NIMZ, Neue Wege der
Koordinaten-
Meßtechnik, In: Zwf 85, 4/1990, S. 210-215;

54 Verfahren zum Verringern des Einflusses von Temperaturänderungen auf Industrieroboter

57 Verfahren zum Verringern des Einflusses von Temperaturänderungen auf Industrieroboter, wobei im Arbeitsraum eines Roboters Referenzmeßpunkte angeordnet sind, die von dem Roboter zu vorbestimmten Zeiten und/oder nach vorbestimmten Kriterien angefahren werden, um den Roboter zu kalibrieren, wobei die aktuellen Daten der Referenzmeßpunkte von einem Rechner nach vorbestimmten Algorithmen verarbeitet werden, um Korrekturdaten zu gewinnen, die der Steuerelektronik des Roboters zugeführt werden, wobei

- in einem nullten Verfahrensschritt eine genaue Vermessung des Wirkpunktes der Roboterhand (TCP) im Arbeitsraum des Roboters unter definierten Bedingungen durchgeführt wird, wobei der Einfluß von Temperaturänderungen weitgehend vermieden wird, und diese Meßwerte die Ausgangsbasis für die Korrektur der temperaturbedingten Abweichungen bilden,
- in einem ersten Verfahrensschritt der Roboter betriebstypisch belastet wird, um im Roboter betriebstypische Erwärmungen zu generieren, wobei an einer Vielzahl von über den gesamten Arbeitsraum des Roboters verteilten Meßpunkten, die translatorischen und/oder rotatorischen Abweichungen A_{ij} des Wirkpunktes der Roboterhand (TCP) vom jeweiligen Sollwert ermittelt werden, wobei der nullte und der erste Arbeitsschritt nur einmal oder in größeren Zeitabständen ausgeführt werden,
- in einem zweiten Verfahrensschritt aus der Menge der im ersten Verfahrensschritt ermittelten Abweichungen nach vorbestimmten Kriterien signifikante, temperaturterminierte Abweichungen A_{U1} ermittelt werden, die eine erste Untermenge $U1$ bilden,
- in einem dritten Verfahrensschritt im Arbeitsraum des Roboters temperaturstabile Referenzpunkte RP_{U1} in den Raumkoordinaten der Untermenge $U1$ oder in deren Nähe angeordnet sind und diese zwischen den Arbeitsaktionen des Roboters nach einem vorbestimmten Zyklus angefahren werden, wobei die aktuellen temperaturbedingten Abweichungen des TCP vom Sollwert ermittelt werden, und
- in einem vierten Verfahrensschritt die ermittelten temperaturbedingten Abweichungen von den jeweiligen Sollwerten einem Rechner zugeführt werden, wobei mit-

tels vorbestimmter Algorithmen, denen ein Fehlermodell zu Grunde liegt, Korrekturdaten ermittelt werden, die der Steuerelektronik des Roboters zugeführt werden, um somit den durch Temperatureinfluß bedingten Positionierfehler des Wirkpunktes der Roboterhand (TCP) zu korrigieren.



DE 198 21 873 C 2

DE 198 21 873 C 2

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verringern des Einflusses von Temperaturänderungen auf Industrieroboter, wobei die Positioniergenauigkeit der Industrieroboter verbessert wird.

Mit steigenden Genauigkeitsanforderungen und der Forderung nach stabilen und robusten Prozeßverläufen sind hohe Ansprüche in bezug auf die zeitunveränderliche Wiederholgenauigkeit und die Positioniergenauigkeit verbunden. Besonders im Dauerbetrieb ist eine Drift der Positioniergenauigkeit festzustellen, deren Ursache innere und äußere Wärmequellen sind, die eine Verformung der kinematischen Kette des Roboters bewirken.

Es ist aus prinzipiellen technischen Gründen nicht möglich, Temperaturänderungen der kinematischen Kette des Roboters zu verhindern. Obwohl der Einfluß äußerer Wärmequellen durch eine konstante Raumtemperatur prinzipiell minimiert werden kann, ist es technisch nicht möglich, die inneren Wärmequellen zu beseitigen, da diese beim Betrieb des Roboters entstehen. So generieren insbesondere die Antriebsbaugruppen Wärme, die sich durch Wärmeleitung in der kinematischen Kette verteilt, was zu zeitabhängigen Längen- und Winkeländerungen derselben führt. Der Einfluß von Temperaturgradienten ist auch durch eine thermosymmetrische Konstruktion der kinematischen Kette nicht vollständig zu verhindern.

Aus dem Stand der Technik ist bekannt, an ausgewählten Stellen der kinematischen Kette Temperaturmeßstellen vorzusehen, wobei in einem Speicher Korrekturwerte zur Korrektur der Lage des TCP abgelegt sind. Dieses Verfahren erfordert einen hohen meßtechnischen Aufwand und hat sich in der Praxis nicht bewährt.

Weitere Vorrichtungen zur Temperaturkompensation werden in den folgenden Dokumenten beschrieben.

Die US 4,668,157 offenbart einen Industrieroboter mit einer Vorrichtung zur Temperaturkompensation. Der Kalibrierzyklus wird ausgelöst, wenn die Temperatur an vorbestimmten Stellen der Armelemente des Roboters einen vorbestimmten Wert erreicht. Das Korrekturverfahren selbst ist jedoch nicht beschrieben.

Die US 5,400,638 offenbart eine Vorrichtung zum Kalibrieren eines Roboters, bei der thermisch unveränderliche Referenzkörper zum Einsatz kommen. Es werden die thermisch bedingten Armlängenänderungen mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt, wobei Winkeländerungen unberücksichtigt bleiben. Das Korrekturverfahren ist nicht so ausführlich beschrieben, daß daraus ein Fachmann bezüglich der Temperaturkompensation eine vollständige technische Lehre entnehmen kann.

Aus der DE 33 02 063 ist eine Einrichtung zur Einflußgrößenkompensation an Werkzeug- oder Meßmaschinen sowie an Industrierobotern bekannt, wobei vorgeschlagen wird, Korrekturwerte für alle möglichen Positionen, thermischen Zustände und Lastbedingungen an einem Industrieroboter zu ermitteln. Es hat sich gezeigt, daß die gegebene Anweisung, an ausgesuchten Stellen eines Industrieroboters Temperatursensoren anzuordnen, nicht zu dem erwünschten Ergebnis führt, da es sehr kompliziert oder aufwendig ist, mittels geeigneter Regressionsverfahren aus den gemessenen Temperaturen die tatsächlichen Verlagerungen zu bestimmen, denn es müssen die räumlichen und zeitlichen Wirkungen sich überlagernder externer und interner Wärmequellen in einem mathematischen Modell erfaßt werden, oder es müssen extrem viele Werte gewonnen werden, deren Ermittlung, Speicherung und Verarbeitung einen praktisch nicht akzeptablen Aufwand erfordern.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß es sich als prak-

tisch unmöglich oder auch als viel zu aufwendig erwiesen hat, einen Temperatursensor am und/oder im Roboter so anzuordnen, daß die gemessenen Temperaturen in einer meßtechnisch verwertbaren Korrelation zu der tatsächlich auftretenden Lageverschiebung des TCP vom Sollwert steht.

Es ist die Aufgabe der Erfindung, die Positioniergenauigkeit eines Roboters zu verbessern, um die vorstehend genannten Probleme zu beseitigen.

Die Aufgabe wird mit einem Verfahren nach Anspruch 1 gelöst.

Danach sind im Arbeitsraum des Roboters Referenzmeßpunkte angeordnet. Das Verfahren wird nach folgenden Verfahrensschritten durchgeführt:

In dem nullten Verfahrensschritt wird zur Ermittlung der temperaturbedingten Abweichungen eine genaue Vermessung des TCP im Arbeitsraum des Roboters unter definierten Bedingungen durchgeführt. Dabei wird sichergestellt, daß der Einfluß von Temperaturänderungen weitgehend vermieden wird. Das wird z. B. dadurch erreicht, daß der Roboter bei konstanter Außentemperatur und nur ganz langsam bewegt wird, so daß von den Antrieben nur wenig Wärme generiert wird. Die dabei gemessenen Werte und ermittelten Parameter bilden die Ausgangsbasis für die Korrektur der temperaturbedingten Abweichungen.

– In dem ersten Verfahrensschritt werden an einer Vielzahl von Meßpunkten, die über den gesamten Arbeitsraum des Roboters verteilt sind, die von der Temperatur bedingten translatorischen und/oder rotatorischen Abweichungen des TCP vom Sollwert unter vorbestimmten betriebstypischen thermischen Belastungen ermittelt. Dieser Verfahrensschritt ist sehr zeitaufwendig und wird nur einmal oder in größeren Zeitabständen durchgeführt.

– In einem zweiten Verfahrensschritt werden aus der Menge der im ersten Verfahrensschritt ermittelten Abweichungen nach vorbestimmten Kriterien die Koordinaten der Meßpunkte ermittelt, die größere Abweichungen aufweisen. Diese Meßpunkte bilden die Untermenge U1.

– In einem dritten Verfahrensschritt werden im Arbeitsraum des Roboters temperaturstabile Referenzpunkte RP_{U1} in den Raumkoordinaten der Untermenge U1 oder in deren Nähe angeordnet. Diese besonders temperaturempfindlichen Punkte werden zwischen den Arbeitsaktionen des Roboters nach einem vorbestimmten Zyklus angefahren. Dabei werden die aktuellen temperaturbedingten Abweichungen A_{U1} des Wirkortes des Endeffektors, nachfolgend als TCP bezeichnet, vom Sollwert ermittelt.

– In einem vierten Verfahrensschritt werden die ermittelten aktuellen temperaturbedingten Istabweichungen der Steuerelektronik des Roboters zugeführt. Die Steuerelektronik korrigiert dann den durch Temperatureinfluß bedingten Positionier- oder Meßfehler des TCP vom Sollwert.

Nach Anspruch 2 entfällt der nullte Verfahrensschritt. Dem Fachmann ist klar, daß der nullte Verfahrensschritt entfallen kann, wenn die in diesem Verfahrensschritt zu ermittelnden Werte für einen bestimmten Robotertyp entweder bekannt sind oder als vernachlässigbar klein angesehen werden können.

Bei einem Verfahren nach Anspruch 3 wird das Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 insofern weitergebildet, daß aus der ersten Untermenge U1 eine weitere Untermenge U2 ermittelt wird. Diese Untermenge U2 enthält Raumpunkte, die noch temperaturempfindlicher sind als die Raumpunkte der

Untermenge U1. Je nach Bedarf und technologischen Anforderungen können die Punkte dieser zweiten Untermenge U2 häufiger als die Punkte der ersten Untermenge U1 angefahren werden. Falls sich bei diesen Punkten unzulässig große Abweichungen der Istposition des TCP von seiner Sollposition einstellen, kann entweder sofort korrigiert werden oder es werden alle Punkte der Untermenge U1 angefahren und anschließend korrigiert.

Bei einem Verfahren nach Anspruch 4 werden weitere, hierarchisch gestaffelte Untermengen gebildet. Es ist somit letztlich auch möglich, in Abhängigkeit von der Arbeitsaufgabe des Roboters, nur einen einzigen, besonders temperaturabhängigen Punkt auszuwählen und diesen häufiger zu überwachen. Falls sich bei diesem Punkt eine unzulässig große Abweichung der Istposition des TCP von seiner Sollposition einstellt, kann wiederum entweder sofort korrigiert werden, oder es werden die Punkte der jeweils darüber liegenden Untermenge angefahren und anschließend korrigiert. Falls die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit erhöht werden und der technologische Ablauf es zuläßt, können die verschiedenen Ebenen der Untermengen frei gewählt werden.

Bei einem Verfahren nach Anspruch 5 wird der TCP so gewählt, daß auch solche temperaturbedingten Abweichungen, die durch Veränderung der Werkzeuggeometrie entstehen, mit erfaßt werden. Beispielsweise wird bei einer Schweißzange deren Arbeitspunkt eingemessen und nicht die Einspannstelle der Schweißzange, da bei betriebsbedingter Erwärmung der Schweißzange eine Längen- bzw. Geometrieänderung derselben eintritt.

Bei einem Verfahren nach Anspruch 6 werden die zur Korrektur des TCP ermittelten Abweichungen mit gespeicherten Werten verglichen, wobei nach vorbestimmten Kriterien entschieden wird, ob die aktuellen Abweichungen betriebstypische Abweichungen sind, die auf Temperatureinflüsse zurückzuführen sind, oder ob die aktuellen Abweichungen eine andere Ursache haben. Diese Ursache kann z. B. ein mechanischer Defekt oder ein zu hoher Verschleiß von Getriebeelementen sein. Wenn eine abnorme, d. h. eine untypische Abweichung festgestellt wird, erfolgt eine Signalausgabe, die auf den abnormen Fehler hinweist, der nicht auf Temperatureinfluß zurückzuführen ist.

Es ist als besonderer Vorteil herauszuheben, daß das erfinderische Verfahren unabhängig vom Bautyp des Roboters anwendbar ist. Weiterhin kann die Erfindung sowohl bei neuen als auch bei Robotern, die bereits im Einsatz sind, angewendet werden.

Die Erfindung wird nunmehr an Hand eines Ausführungsbeispiels und einer beigelegten Zeichnung näher erläutert.

Fig. 1 zeigt eine Ausführungsform eines Programmablaufplans des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Nachfolgend wird die in der Praxis übliche Vorgehensweise zur Anwendung der Erfindung an einem sechssachsigen Vertikalknickarmroboter mit offener kinematischer Kette und mit geschlossener Viergelenkkette zur Steuerung der zweiten und der dritten Achse beschrieben.

1. Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens einschließlich der Generierung des Fehlermodells vor dem Produktionseinsatz

1.1. Erforderliche Ausrüstungen für die Bestimmung des Fehlermodells am Roboter

- Industrieroboter mit Steuerung,
- Berührungsloses 3D-Entfernungsmeßsystem (Lasers-tracker-system) zur Ermittlung der absoluten Positionsdaten,

- PC mit Kalibriersoftware zur Positionsdatenerfassung sowie zur Modellierung, Identifikation und Auswertung der Modellparameter.

1.2. Generierung des Fehlermodells

Das Vorgehen zur Generierung des Fehlermodells läßt sich in folgende drei Teilschritte gliedern:

- Modellbildung: Beschreibung der Endeffektorpose (Position und Orientierung) des Roboters durch eine Funktion der Stellung der Bewegungsachsen und der zu berechnenden Modellparameter,
- Messung: Präzise Vermessung der Position des Endeffektors in ausgewählten Arbeitsraumpositionen,
- Identifikation: Numerische Berechnung der Modellparameter, ausgehend vom nominalen Modell, so daß Positions- und Bahnabweichungen zwischen Modellfunktion und Messungen minimal werden.

1.2.1. Modellierung statischer und dynamischer Parameter

Zur Bewegungsplanung des hier beschriebenen Industrieroboters wird ein sogenanntes nominales Modell eingesetzt. Die Beschreibung der Endeffektorpose erfolgt dabei durch Transformationsmatrizen, die sich aus den Winkelwerten der sechs Achsmeßsysteme und den aus den Konstruktionszeichnungen des Roboters bekannten Achslängen (Nennmaße) ergeben.

Zur exakteren Beschreibung des realen Roboters wird mit Hilfe der Kalibriersoftware ein erweitertes mathematisches Modell, das sog. Fehlermodell, zusammengestellt. Dieses Modell beschreibt die Pose des Endeffektors als Funktion der Winkelwerte der sechs Drehachsen und der später bei der Identifikation zu quantifizierenden Parameter des Fehlermodells.

Die Modellierung beinhaltet folgende stationäre Parameter (Abbildung von konstruktions-, fertigungs- und montagebedingten Fehlergrößen):

- Länge der einzelnen Achselemente (Sockel, Unterarm, Oberarm, Hand)
- Schiefwinkligkeit von je zwei der Bewegungsachsen zueinander,
- Nullagenfehler der Winkelmeßsysteme der Drehachsen,
- Getriebefehler (Exzentrizität, Elastizität und Spiel),
- Gelenkungenauigkeiten (Elastizität und Spiel) sowie
- Lasteinflüsse (Bauteilelastizität).

Die Zusammensetzung der zu identifizierenden Parameter kann vom Anwender frei gewählt werden. Die Genauigkeitssteigerung ist dabei mit steigender Anzahl der verwendeten Parameter zunehmend.

Zur Modellierung des thermischen Zustands der Roboterkinematik und der daraus resultierenden Temperaturdrift sind folgende dynamische Parameter im Fehlermodell berücksichtigt:

- Thermisch bedingte Achslängenänderungen,
- Änderung der Schiefwinkligkeit der Bewegungsachsen aufgrund thermisch bedingter zwei- und dreidimensionaler Verformungen der Achselemente,
- Getriebeungenauigkeiten/-ungleichmäßigkeiten aufgrund thermisch bedingter Verspannungen bzw. der Spielveränderung,
- Variables Gelenkspiel aufgrund thermischer Ver-

spannungen der Drehachsenlagerungen.

1.2.2. Messung der Positioniergenauigkeit des Industrieroboters

Mit Hilfe des Lasertrackersystems wird die Absolutgenauigkeit des Roboters im Arbeitsraum bestimmt. Die gemessenen Endeffektorpositionen sind zusammen mit den aus der Robotersteuerung bekannten nominalen Posen die Eingangsdaten zur Berechnung der Modellparameter.

Bei der Auswahl der zu messenden Endeffektorpositionen ist darauf zu achten, daß diese über den gesamten Arbeitsraum gleichmäßig verteilt sind. Je größer das für die Messungen ausgenutzte Arbeitsraumvolumen ist, um so exakter kann die Berechnung der Modellparameter erfolgen.

Der Detaillierungsgrad des Fehlermodells (Anzahl der zu identifizierenden Parameter) legt die benötigte Anzahl der zu messenden Posen fest.

1.2.3. Identifikation der stationären Parameter

Zur Bestimmung der stationären Parameter (konstruktions-, fertigungs- und montagebedingte Fehlergrößen) des Fehlermodells werden die unter 1.2.2. festgelegten Arbeitsraumpositionen unter stationären Bedingungen mit dem Roboter angefahren und gemessen. Zur Identifikation der unter 1.2.1. aufgelisteten Parameterarten sind bei dem betrachteten Roboter insgesamt 100 verschiedene Referenzposen zu messen.

Die Identifizierung der Parameter erfolgt:

- bei gleichbleibender Raumtemperatur ($20^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ K}$),
- unter Nennlast (an der Roboterhand) und
- unter Verwendung einer Bahngeschwindigkeit von 25 mm/s beim Anfahren und Verfahren zwischen den Meßposen (Vermeidung signifikanter Verlustleistungen in den Antrieben durch geringe Verfahrensgeschwindigkeit).

Die zu messenden Positionen werden mit dem Roboter exakt (ohne Überschleifen) angefahren, mit dem Lasertracker absolutgenau zum Roboterbasiskoordinatensystem gemessen und zusammen mit den entsprechenden nominalen Positionsdaten aus der Robotersteuerung in einer Datei abgelegt.

Die aus diesen Daten numerisch berechneten stationären Parameter beschreiben das reale Robotermodell (stationäres Fehlermodell) und bilden die Bezugsbasis für die anschließende Identifikation der dynamischen Parameter (thermisch bedingte Fehlergrößen).

1.2.4. Identifikation der dynamischen Parameter

Zur Identifikation der dynamischen Parameter müssen die in 1.2.2 festgelegten Referenzposen regelmäßig in sogenannten Meßzyklen angefahren werden. Die Bahngeschwindigkeit zwischen den einzelnen Meßpunkten beträgt $v = v_{\max} [\text{mm/s}]$.

Zwischen den einzelnen Meßzyklen wird der thermische Zustand der Roboterstruktur durch ein Belastungsprogramm systematisch verändert. Dazu wird der Roboter permanent mit $v = v_{\max} [\text{mm/s}]$ zwischen zwei Arbeitsraumpunkten bewegt. Zwischen diesen Arbeitsraumpunkten überstreicht jede Drehachse einen Winkel von 60° . Durch die Last an der Roboterhand (Nennlast, vgl. 1.2.3) wird eine maximale Belastung und damit eine starke Erwärmung aller Achsen gewährleistet.

Dieses Belastungsprogramm wird alle 10 min durch einen Meßzyklus für ca. 1 min unterbrochen und bis zum Erreichen des thermischen Beharrungszustandes zyklisch wiederholt. Der Beharrungszustand ist bei dem betrachteten Roboter nach ca. 6 bis 8 h erreicht. Die gemessenen thermisch bedingten Positionsabweichungen (Temperaturdrift) werden für jeden Meßpunkt in einer Datei abgespeichert.

Nach Erreichen des Beharrungszustandes werden die gesammelten Positionsabweichungen mittels der Kalibriersoftware ausgewertet.

Die Temperaturdrift an jedem Meßpunkt und die entsprechenden nominalen Positionsdaten aus der Robotersteuerung sind Eingangsdaten zur Berechnung der dynamischen thermischen Parameter.

Ergebnis dieser Auswertung ist ein Katalog variabler Parameter, die die Veränderung der Ausprägung der stationären Parameter in Abhängigkeit des thermischen Zustandes und der Untersuchungsdauer beinhaltet.

1.2.5. Auswahl signifikanter dynamischer Parameter

Mit Hilfe statistischer Auswerteverfahren sind aus dem unter 1.2.4 erstellten Katalog diejenigen dynamischen Parameter auszuwählen, die den größten thermisch bedingten Änderungsgrad und damit den größten Einfluß auf die Temperaturdrift aufweisen.

Abhängig vom konstruktiven Aufbau der Kinematik sind dies bei dem hier untersuchten Roboter die Achslängenänderungen Δa , Δb , Δc , Δd , Δe , Δf und die Getriebeungenauigkeiten in den Hauptachsen $\Delta A1$, $\Delta A2$ und $\Delta A3$.

Zur Kompensation der Temperaturdrift müssen diese neun signifikanten Parameter während des Betriebs in Abhängigkeit des thermischen Zustandes aktualisiert und in die Bewegungsplanung des Roboters implementiert werden.

1.2.6. Zusammenstellung des dynamischen Fehlermodells

Nach der Identifikation der stationären und signifikanten thermischen Parameter wird das dynamische Fehlermodell zur exakten Bewegungsplanung aufgestellt.

In den mathematischen Algorithmen zur Bewegungsplanung werden, entsprechend der unter 1.2.1 durchgeführten Modellierung, alle stationären Parameter eingetragen und als nicht veränderbar deklariert.

Die unter 1.2.5 ermittelten signifikanten thermischen Parameter (im vorliegenden Fall Δa , Δb , Δc , Δd , Δe , Δf , $\Delta A1$, $\Delta A2$, $\Delta A3$) werden hingegen als variabel deklariert.

So kann während des Betriebs in Abhängigkeit des Verformungszustandes eine Aktualisierung dieser Parameter vorgenommen werden. Bezugsbasis und Startwert für die ermittelten dynamischen Parameter sind die Werte, die unter 1.2.3. als statische Parameter für den Roboter identifiziert worden sind.

1.2.7. Berücksichtigung des dynamischen Fehlermodells bei der Bewegungsplanung

Zur Berücksichtigung der thermischen Parameter bei der Positions- und Bahnplanung muß eine Anpassung des Steuerungsmodells (dynamisches Fehlermodell) erfolgen. Da die thermischen Parameter variabel sind, muß eine Möglichkeit zum regelmäßigen Abgleich des dynamischen Fehlermodells im Betrieb geschaffen werden.

Bei dem vorliegenden, zu kalibrierenden Roboter wird ein nominales Modell zur Positions- und Orientierungsrechnung verwendet. In dieser Robotersteuerung liegt somit keine mathematische Beschreibung der Kinematik vor, die eine Berücksichtigung der ermittelten statischen und dyna-

mischen Parameter ermöglicht. Zudem kann in der aktuellen Steuerungssoftware keine Veränderung von Systemparametern während des Betriebs vorgenommen werden.

Aus diesen Gründen muß das dynamische Fehlermodell in einem externen PC implementiert werden, der über eine serielle Schnittstelle mit der Robotersteuerung verbunden ist. Zur Berücksichtigung der thermisch bedingten Effekte muß im PC ein Konverter bereitgestellt werden. In diesem Konverter werden mit Hilfe des dynamischen Fehlermodells berechnete Positionsdaten in Positionsdaten des nominalen Modells umgerechnet.

Die so unter Berücksichtigung der dynamischen Parameter (Temperaturdrift) korrigierten nominalen Positionen werden dann über die serielle Schnittstelle zur Robotersteuerung übertragen und den abzuarbeitenden Roboterprogrammen zur Verfügung gestellt.

2. Anwendung der Erfindung am Beispiel "Meßroboter"

Zur flexiblen Automatisierung von Meßabläufen, beispielsweise in der Automobilindustrie, sollen zukünftig Industrieroboter als Meßgeräte eingesetzt werden. Zur Messung der Maßhaltigkeit von Karosserieteilen wird ein laseroptisches Meßsystem an der Roboterhand angeordnet.

Einsatzhemmnis ist das unzureichende Positionierverhalten – bedingt durch zeitvariante, betriebsabhängige thermische Einflüsse. Zur Minimierung dieser Effekte kann das beschriebene Kalibrierverfahren eingesetzt werden. Die dafür notwendigen Einrichtungen und die Vorgehensweise werden nachstehend beschrieben.

2.1. Einrichtungen zur Online-Kalibrierung

Grundlage der Temperaturdriftkompensation ist die Bestimmung der aktuellen Positionsabweichung des Roboter-Endeffektors an Referenzpositionen im Arbeitsraum. Zur Messung der translatorischen Positionsabweichung wird das an der Roboterhand angeordnete Meßsystem genutzt.

Als Referenzkörper kommen Stahlwürfel zum Einsatz, die an Stangen aus Invarstahl mit hoher Maßbeständigkeit bei Temperaturschwankungen im Arbeitsraum stationär positioniert sind.

Zur Identifikation der signifikanten Parameter (vgl. 1.2.5) wurden insgesamt neun Referenzpositionen eingerichtet. Die Lage dieser Referenzpositionen ist beliebig – es ist lediglich darauf zu achten, daß möglichst große Achswinkelunterschiede zwischen den einzelnen Positionen realisiert werden.

2.2. Kalibrierzyklus

Zur Kompensation der Temperaturdrift an den genutzten Arbeitsraumpositionen wird ein sog. Kalibrierzyklus mit folgendem Ablauf definiert:

- Verfahrensprogramm zur Messung der Positionsabweichung an den Referenzkörpern,
- Berechnung der thermischen Parameter und Aktualisierung des dynamischen Fehlermodells,
- Berechnung der korrigierten Arbeitsraumpositionen für jede im Roboterprogramm enthaltene Meßposition,
- Konvertierung der berechneten Arbeitsraumpositionen in korrigierte nominale Arbeitsraumpositionen,
- Übertragung der korrigierten nominalen Arbeitsraumpositionen (Meßpositionen) in die Robotersteuerung.

2.3. Integration der Online-Kalibrierung in den Produktionsprozeß

Der Produktionsprozeß "Vermessen von Karosserieteilen" wird in zwei Routinen, den Kalibrierzyklus (siehe Abschnitt 2.2) und den Arbeitszyklus (Meßbetrieb, Vermessung des Karosserieteils), gegliedert.

Vor Produktionsbeginn (Beginn der Produktion nach Wochenenden, Produktwechsel) bzw. nach Produktionsunterbrechung (Aussetzbetrieb, Instandhaltung usw.) wird grundsätzlich ein Kalibrierzyklus zur Aktualisierung des dynamischen Fehlermodells und zur Korrektur aller Meßpunkte durchgeführt. Anschließend kann der Meßbetrieb (Arbeitszyklus) aufgenommen werden.

Um eine gleichbleibend hohe Meßgenauigkeit während des Betriebs gewährleisten zu können, muß ein regelmäßiger Abgleich des dynamischen Fehlermodells auf der Grundlage des aktuellen Verformungszustands des Roboters erfolgen.

Um Nebenzeiten zu minimieren, die durch jeden Kalibrierzyklus bedingt sind, wird eine verformungsabhängige Regelung der Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kalibrierzyklen eingeführt.

Diese Regelung basiert auf der zyklischen Überwachung der Positioniergenauigkeit des Roboters an einem der Referenzkörper. Die Überwachung der Genauigkeit wird in den Arbeitszyklus integriert. Anhand der aktuellen Positionsabweichung an diesem Referenzkörper erfolgt die Entscheidung, ob erneut ein Kalibrierzyklus erforderlich ist oder der nächste Arbeitszyklus ausgeführt werden kann.

Der Schwellwert wurde in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel auf eine summarische Abweichung von $\geq 0,1$ mm bezüglich der vor dem letzten Kompensationszyklus gemessenen Abweichung am Referenzkörper festgelegt.

Der Referenzkörper zur Überwachung der aktuellen Positioniergenauigkeit ist so zu positionieren, daß das Anfahren dieser Position gut in den Bewegungsablauf des Arbeitszyklus integrierbar ist.

Es ist dem Fachmann offensichtlich, daß das vorstehend beschriebene Verfahren modifiziert werden kann, ohne dabei den Grundgedanken der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Verringern des Einflusses von Temperaturänderungen auf Industrieroboter, wobei im Arbeitsraum eines Roboters Referenzmeßpunkte angeordnet sind, die von dem Roboter zu vorbestimmten Zeiten und/oder nach vorbestimmten Kriterien angefahren werden, um den Roboter zu kalibrieren, wobei die aktuellen Daten der Referenzmeßpunkte von einem Rechner nach vorbestimmten Algorithmen verarbeitet werden, um Korrekturdaten zu gewinnen, die der Steuerelektronik des Roboters zugeführt werden, wobei
 - in einem nullten Verfahrensschritt eine genaue Vermessung des Wirkpunktes der Roboterhand (TCP) im Arbeitsraum des Roboters unter definierten Bedingungen durchgeführt wird, wobei der Einfluß von Temperaturänderungen weitgehend vermieden wird, und diese Meßwerte die Ausgangsbasis für die Korrektur der temperaturbedingten Abweichungen bilden,
 - in einem ersten Verfahrensschritt der Roboter betriebstypisch belastet wird, um im Roboter betriebstypische Erwärmungen zu generieren, wobei an einer Vielzahl von über den gesamten Arbeitsraum des Roboters verteilten Meßpunkten, die

translatorischen und/oder rotatorischen Abweichungen A_U des Wirkpunktes der Roboterhand (TCP) vom jeweiligen Sollwert ermittelt werden, wobei der nullte und der erste Arbeitsschritt nur einmal oder in größeren Zeitabständen ausgeführt werden, 5

– in einem zweiten Verfahrensschritt aus der Menge der im ersten Verfahrensschritt ermittelten Abweichungen nach vorbestimmten Kriterien signifikante, temperaturdeterminierte Abweichungen A_{U1} ermittelt werden, die eine erste Untermenge $U1$ bilden, 10

– in einem dritten Verfahrensschritt im Arbeitsraum des Roboters temperaturstabile Referenzpunkte RP_{U1} in den Raumkoordinaten der Untermenge $U1$ oder in deren Nähe angeordnet sind und diese zwischen den Arbeitsaktionen des Roboters nach einem vorbestimmten Zyklus angefahren werden, wobei die aktuellen temperaturbedingten Abweichungen des TCP vom Sollwert ermittelt werden, und 15 20

– in einem vierten Verfahrensschritt die ermittelten temperaturbedingten Istabweichungen von den jeweiligen Sollwerten einem Rechner zugeführt werden, wobei mittels vorbestimmter Algorithmen, denen ein Fehlermodell zu Grunde liegt, Korrekturdaten ermittelt werden, die der Steuerelektronik des Roboters zugeführt werden, um somit den durch Temperatureinfluß bedingten Positionierfehler des Wirkpunktes der Roboterhand (TCP) zu korrigieren. 25 30

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der nullte Arbeitsschritt entfällt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß aus der ersten Untermenge $U1$ eine zweite Untermenge $U2$ ermittelt wird, wobei die Abweichungen A_{U2} der zweiten Untermenge $U2$ signifikanter sind als die Abweichungen A_{U1} der Untermenge $U1$. 35

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß weitere, hierarchisch gestaffelte Untermengen gebildet werden, deren Abweichungen jeweils signifikanter sind als die der vorhergehenden Obermenge. 40

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der TCP so gewählt wird, daß auch die temperaturbedingten Abweichungen, die durch Veränderung der Werkzeuggeometrie entstehen, mit erfaßt werden. 45

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die zur Korrektur des TCP ermittelten Abweichungen gespeichert und mit vorbestimmten Werten verglichen werden, wobei nach vorbestimmten Kriterien entschieden wird, ob die Abweichungen betriebstypische Abweichungen sind, die auf Temperatureinflüsse zurückzuführen sind, oder ob die Abweichungen eine andere Ursache haben, wobei in diesem Fall ein Aufforderungssignal zur Fehlersuche ausgegeben wird. 50 55

- Leerseite -

